

SANAL GERÇEKLİK SİMÜLATÖRLERİNDE KULLANILMASI İÇİN ÖZGÜN YAPILI ROBOT TASARIMI

Tunç BİLGİNCAN*, Özgün SELVİ*, Yalkın KANT** ve Mehmet İsmet Can DEDE*

(*) İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, 35430 İZMİR

(**) Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 35210 İZMİR

tuncbilgincan@iyte.edu.tr, ozgunselvi@iyte.edu.tr, candede@iyte.edu.tr

ÖZET

Haptik teknoloji, kuvvet ve yüzey bilgisi geri beslemesi yardımı ile uzaktan kumanda işlerinde uzaktan mevcudiyet hissini dolayısı ile hassasiyetini ve yerinde yapılan robotik işlerin hassasiyetini arttırmıştır. İlgilenilen noktadaki basınç veya kuvvet gibi fiziksel öğelerin ölçülmesi veya yaratılması ve bu fiziksel öğelerin operatörün kullandığı haptik cihaz aracılığıyla iletilmesiyle operatöre kuvvet geri beslemesi gerçekleştirilir. Bahsi geçen sistemin oluşturulmasında haptik cihazın özel uygulamasına uygun olarak tasarımı, analizi ve üretim aşamaları önem kazanmaktadır. Günümüzde, micro-cerrahi, uzaktan ameliyat ve nano-manipülasyon kavramları ortaya çıkmış, hassasiyet gerektiren bu robotik işler için haptik teknoloji çözüm oluşturmuştur. Bu çalışmada, haptik uygulamalarda hassasiyetin artırılması amacıyla literatür araştırması yapılmış ve olası manipülör tasarımları incelenmiştir. İnceleme çıktıları sonucunda uygun kavramsal manipülör tasarımları belirlenmiştir. Bilgisayar-destekli-tasarım programında (CAD) ortamında incelenmesi ve kinematik analizlerinin yapılmasıyla, nihai tasarım oluşturulmuş ve üretilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Haptik teknoloji, uzaktan kumanda operasyonları, robotik, paralel manipülörler

NOVEL STRUCTURAL DESIGN OF A ROBOTIC DEVICE FOR USE IN VIRTUAL REALITY SIMULATORS

ABSTRACT

Haptics technology has increased the precision and telepresence of the teleoperation and precision of the in-house robotic applications by force and surface information feedback. Force feedback is achieved through sending back the pressure and force information via a haptic device as the information is created or measured at the point of interest. In order to configure such a system, design, analysis and production processes of a haptic device, which is suitable for that specific application, becomes important. Today, the concepts of micro-surgery, telesurgery and nano-manipulation arose. Haptics technology provided a solution for the precision requirements of these applications. In this work, literature is reviewed and possible robot manipulator designs are investigated to increase the precision in haptics applications. As a result of the investigations, conceptual designs are developed. Ultimately, final design is selected and produced after it is investigated in computer-aided-design (CAD) environment and its kinematic and structural analyses are carried out.

Keywords: Haptic technology, teleoperation, robotics, parallel manipulators

1. GİRİŞ

Dokunma duyusu insan beyninin çevreyi algılayabilmesi ve bulunduğu çevre içerisinde karmaşık sayılabilecek işleri gerçekleştirebilmesi için oldukça önemli bir geri bildirim sağlamaktadır. Doğduğumuz ilk

andan itibaren bizim için çok önemli olan dokunma duyusu, görme duyumuza kıyasla bile çevreyi algılamamızda daha önemli olmakta, yaptığımız birçok işte bu duyumuza daha çok kullanmakta ve bu duyumuza güvenmekteyiz. Bu sebepten dolayı, dokunma duyusu çeşitli aletlerle ve robotlarla

yaptığımız işlerde de kontrol ve hassasiyet için gerekli olmakta ve ihtiyaç duyulmaktadır.

Geçmişteki kumanda sistemlerinde, sistemin mekanik yapısıyla operatöre iletilen kuvvet, basınç ve titreşim gibi geri beslemeler günümüzde servo kontrollü mekanizmalar haline almıştır. Böylece dokunma duyusunun, kumanda edilen sistem hakkında operatöre önemli bir geri besleme olmasından dolayı, sanal olarak kuvvet yada yüzey yapısı gibi fiziksel özelliklerin geri beslemesinin operatöre iletilmesi sağlanmıştır.

Haptik teknoloji günümüzde tıbbi amaçlı uygulamalarda, uzay ve havacılık endüstrisinde, eğitim amaçlı simülasyonlarda, nano boyuttaki manipülasyonlarda ve üç boyutlu tasarım gibi çok geniş alanda uygulama alanı bulmuştur.

Bu çalışmada geliştirilen haptik cihaz tasarımının, sanal gerçekliği kullanan simülasyonlarda insan-makina arayüzü olarak işlev görmesi amaçlanmıştır. Cihazın yapısı işlemlerin hassasiyetini artırması amacıyla paralel platform robotu olarak planlanmıştır. Robotun altı serbestlik derecesine ulaşması için ise platformun üstüne yerleştirilecek ikincil bir oryantasyon denetimini sağlayan mekanizma düşünülmüştür. Bu sayede elde edilecek mekanizma hibrit yapısı ile özgün bir haptik cihaz formasyonuna kavuşacaktır.

Bildiride, giriş bölümünü takiben geçmişte yapılan haptik cihaz tasarımı ve haptik uygulamaları sunulmuştur. Bir sonraki bölümde literatürde yapılan çalışmaların ışığında kavramsal tasarımlar oluşturulmuş ve CAD ortamında incelenmiştir. Sistem Analizi bölümünde ise seçilen nihai tasarım anlatılmış, yapısal ve kinematik analizleri verilmiştir. Sonuçlar bölümünde ise yapılan çalışma sonucunda üretilen robot üzerindeki tartışmalar sunulmuştur.

2. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR

Haptik cihazlar tıp alanında, robotik ameliyatlara ve tıbbi görüntüleme işlerinin hassasiyetini artırarak, hassasiyet gerektiren bu operasyonları mümkün kılmıştır. Kuvvet geri beslemesiyle hastaya mümkün olan en az zarar verilerek gerçekleştirilen bu operasyonlar yakın bir gelecekte

operasyonların robotlar yardımıyla gerçekleştirilebilmesini sağlayacak ve hastaların iyileşme süresini kısaltacaktır.

Tıbbi amaçlı yapılan haptik uygulamalara örnek olarak [1] numaralı kaynakta sunulan çalışmada, Katsura vd. tıbbi amaçlı haptik makas tasarlamışlar ve üretmişlerdir. Haptik cihazların tıbbi alanda kullanımına diğer bir örnek, Maurin vd. [2] tarafından bilgisayarlı tomografide kullanılan paralel yapı haptik iğne uygulamasıdır.

Haptik cihazlar sadece tıbbi amaçlı uygulamalar için değil aynı zamanda tıbbi amaçlı sanal gerçeklik içeren tıbbi eğitim cihazlarında da uygulama alanı bulmuştur. Payandeh ve Li [3], yaptıkları çalışmada düşük maliyetli elektromekanik haptik teknolojiyi, eğitim amaçlı sanal laparoskopik ameliyatlarda uygulamasının gelişimini incelemişler ve kendi tasarımlarını deneysel olarak test etmişlerdir. Diğer bir eğitim amaçlı sanal gerçeklik uygulaması Vidala vd. [4] tarafından kuvvet geri beslemeli iğne ile sanal görüntüyü birleştiren uygulamadır. Özel sayılabilecek bir uygulama olarak tavşan dudağı olarak bilinen şekil bozukluğunun bilgisayar destekli haptik sanal gerçeklik uygulaması Schendel vd. tarafından yapılmıştır [5]. P. Wang vd. [6] sinir sistemi ameliyatını sınır eleman metodu ile modelleyerek gerçekçi doku yaratan, sanal gerçeklik cihazını sunmuşlardır. Kaynakça [7]'de Maass vd. tarafından endoskopik ameliyatlara ve laparoskopik uygulamalar için yeni tür haptik cihazlar tasarlanmış ve haptik cihazla kullanımı daha kolay olan esnek bir arayüz geliştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmada elektronik kontrol sistemi parçalı yapıda olup USB ve network teknolojilere uygundur. Tıbbi tanı ve ameliyat amaçlı sanal gerçeklik uygulaması, Montgomery vd. tarafından histeroskopi uygulamaları için sunulmuştur [8]. Kalp damar cerrahisinde uzmanların kalp kaslarına doğrudan masaj yapabilmeye becerisine sahip olması gerekmektedir, ancak gerçekte bunun ameliyatlarda sırasında yapılması sınırlı olmaktadır. Bunun için Tokuyasu vd. tarafından [9] kalbin gerçekçi elastikliğini sanal olarak yaratan haptik kalp kası masaj cihazı geliştirilmiştir.

Haptik teknoloji sadece tıbbi tanı veya ameliyat amaçlı değil aynı zamanda

uygulamalı öğretimin çok önemli olduğu dış ameliyatlarında da kullanılmaktadır. Heiland vd. VOXEL-MAN [10] sistemini kullanarak bilgisayarlı tomografi görüntüleri ile üç boyutlu örnek üzerinde dış çekiminin gerçekçi örneğini yapmışlar ve karışık anatomik örneklerde bile bunun mümkün olduğunu ortaya koymuşlardır [11]. Dişçilikte haptik özellikli sanal gerçeklik uygulamalarına diğer bir örnek; Sohmura vd. tarafından, yine bilgisayarlı tomografi ile görüntülenmiş çene kemiğinde yapısal bozukluk olan örneklerde kemiğin kesme, ayırma, ve miktarsal olarak yeniden düzenlenmesi örneğidir [12].

Günümüzde nano boyuttaki teknolojinin gelişmesi, çok küçük olan taneciklerin yine çok küçük boyutta olan robotlarla, parçacıklarına ayrılması, ayıklanması, ayrıştırılması ve düzenlenmesini gerektirmiştir. Sağladığı hassasiyet ile haptik teknoloji bu tip uygulamalar için önem kazanmıştır. Fahlbusch vd. yaptıkları çalışmada [13], nano teknoloji cihazlarını incelemiş ve elektron mikroskobu ile birleştirilebilen, nano boyutta hareketi sağlayan yeni bir çeşit robot tasarlamışlar, ayrıca nano boyutta konumlandırma, hareket ettirme ve yakalama cihazları geliştirmişlerdir. Andrew. vd. tarafından haptik teknolojinin molekülleri analiz etmek, moleküllerin iç yapılarını anlamak ve modellemek için kullanışlı olduğu vurgulanmıştır [14].

Haptik cihazlar, üç boyutlu modelleme ve tasarımda aşamalarında, diğer bütün uygulamalarında olduğu gibi, kullanıcıyla sanal ortamın ilişkisini artırmakta, buna bağlı olarak bilgisayar-destekli-tasarımı geliştirmekte ve kolaylaştırmaktadır. Bordegoni vd. [15], haptik teknolojinin iki tür uygulamasından bahsetmiş; birincisi fiziksel cisimlerin dijital bilgisayar ortamına aktarılması, ikincisi sanal ürünlerin ergonomisini artırmak için haptik cihazların kullanılmasıdır. Haptik teknolojinin bu üç boyutlu tasarım ve şekillendirme alanında diğer bir uygulaması, Gao vd. tarafından [16] üç boyutlu tasarımların haptik cihazlar ile şekillendirilmesi ve yontulması için kullanılmıştır.

Haptik teknoloji sağladığı yararlar ile bir çok alanda kendine uygulama alanı bulmuştur. He vd. tarafından sanal uzaktan kumanda sistemine dayanan, haptik teknoloji ile robot

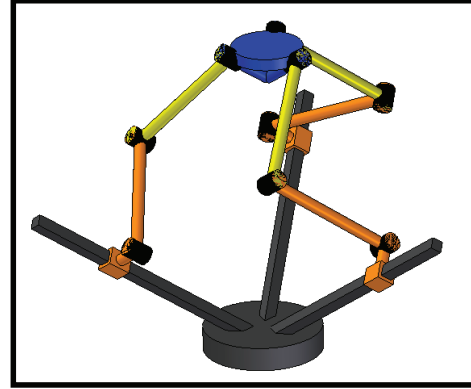
yörüngesinin belirlenmesi yapılmış ve bu tekniğin sağlayacağı gelişmelerden bahsedilmiştir [17]. Diğer bütün sanal uygulamalarda olduğu gibi haptik teknoloji sağladığı gerçeklik hissi ile oyun endüstrisinde de kullanılmaktadır. Park vd. tarafından [18] bilgisayar oyunları için haptik robot tasarlanmış ve üretilmiş ve sanal ortamda test edilmiştir.

3. KAVRAMSAL TASARIMLAR

Yapılan bu çalışmada seri, paralel ve hibrit olmak üzere mevcut bulunan bütün robot kol türleri ve mevcut olan tasarımlar incelenmiş, yapılan bu inceleme sonucunda hibrit yapının uygun olacağı düşünülmüş, bu kapsamda kavramsal tasarımlar oluşturulmuştur. Geliştirilmek istenilen haptik uygulama için hibrit yapı, ana gövde ve kontrol kolu mekanizması olarak iki ana başlıkta ele alınmıştır.

3.1. Kartezyen Paralel Manipulatör

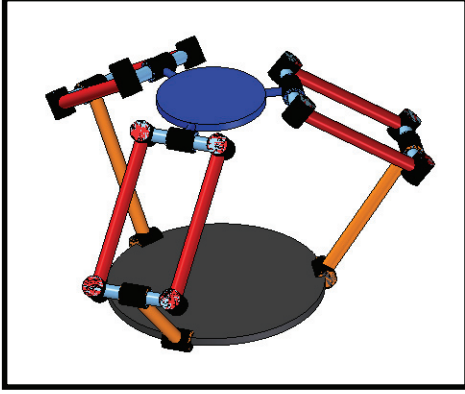
Kolay doğru ve ters kinematik analizi ile üç serbestlik dereceli Kartezyen paralel manipülâtörünün onbir bağlantı elemanı, yirmibir eklem tarafından bir arada tutulmaktadır. Mekanizmanın CAD modeli Şekil 1'de verilmiştir.



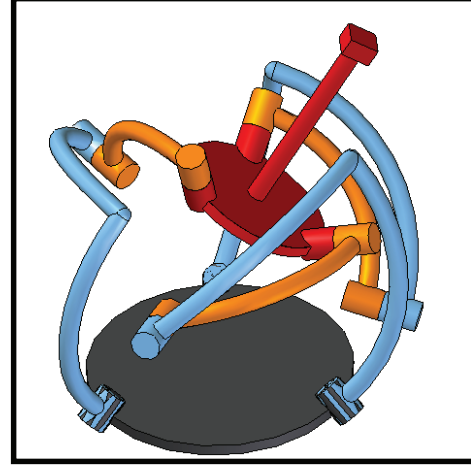
Şekil 1. Kartezyen Paralel Manipulâtör

3.2. Delta Manipulâtör

Karmaşık doğru ve ters kinematik analizi ile üç serbestlik dereceli Delta manipülâtörünün on yedi bağlantı elemanı, yirmibir eklem tarafından bir arada tutulmaktadır. Mekanizmanın CAD modeli Şekil 2'de verilmiştir.



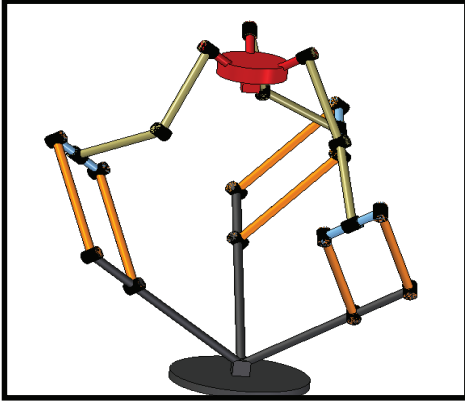
Şekil 2. Delta Manipülator



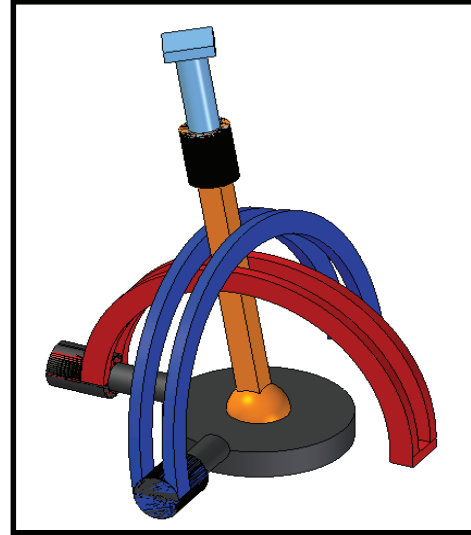
Şekil 4. Agile Eye

3.3. R-Küp Manipulater

Kolay doğru ve ters kinematik analizi ile üç serbestlik dereceli R-Cube manipülatorünün on yedi bağlantı elemanı, yirmibir eklem tarafından bir arada tutulmaktadır. Mekanizmanın CAD modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. R-Küp Manipülator



Şekil 5. Hibrit-Küresel Manipülator

3.4. Agile Eye

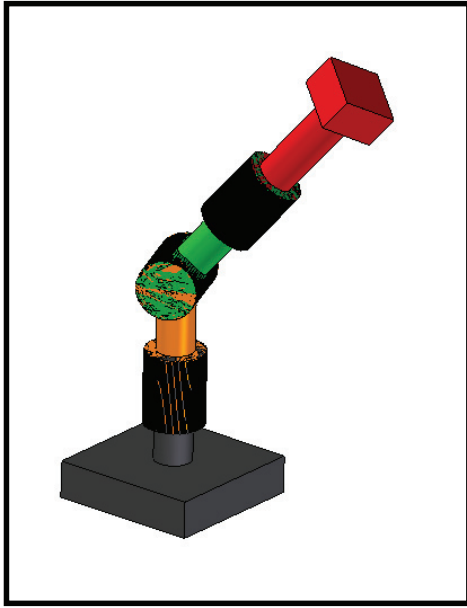
Kolay doğru ve ters kinematik analizi ile üç serbestlik dereceli Agile Eye manipülatorünün sekiz bağlantı elemanı, dokuz eklem tarafından bir arada tutulmaktadır. Mekanizmanın CAD modeli Şekil 4'te verilmiştir.

3.5. Hibrit-Küresel Manipülator

Kısmi olarak karmaşık doğru ve ters kinematik analizi ile üç serbestlik dereceli hibrit-küresel manipülatorünün dört bağlantı elemanı, altı eklem tarafından bir arada tutulmaktadır. Mekanizmanın CAD modeli Şekil 5'te verilmiştir.

3.6. Seri Küresel Manipülator

Karmaşık doğru ve ters kinematik analizi ile üç serbestlik dereceli seri küresel manipülatorünün üç bağlantı elemanı, dört eklem tarafından bir arada tutulmaktadır. Mekanizmanın CAD modeli Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Seri Küresel Manipülör

4. SİSTEMİN ANALİZİ

İki ana başlıkta oluşturulan kavramsal tasarımların üstün ve zayıf yönleri tartışılmış ve tablolar halinde incelenmiştir (bkz. Tablo 1 ve Tablo 2).

Tablo 1. Ana gövde Kavramsal Tasarımlar

	Delta	Kartezyen	R-Küp
Eklem Sayısı	21	12	21
Bağlantı elemanı sayısı	17	11	17
Kinematik analiz	Karmaşık	Basit	Basit
Bağımsız hareket	Hayır	Evet	Evet
Tahrik	Dönel	Doğrusal	Dönel
Zemine bağlı (motorlar)	Evet	Evet	Evet
Mafsal türleri	R	R-P	R
Maliyet	Düşük	Orta	Düşük

4.1. Nihai Tasarım

Yapılan araştırma ve CAD ortamında modellemeler sonucunda, R-Küp tasarımının, mekanizmanın hem kendisi hemde yapısında bulunan silindirik eklemlerinin yapımındaki sadeliği, kinematik analizinin çözümünün kolaylığı sebebiyle hibrit küresel manipülör

ile birlikte kesin tasarımdaki ihtiyacımızı karşıladığına karar verilmiştir.

Tablo 2. Kontrol kolu Mekanizması Kavramsal Tasarımlar

	Agile eye (Paralel – Küresel)	Hybrit - Küresel	Seri- Küresel
Eklem Sayısı	9	6	3
Kinematik analiz	8	4	4
Ters Kinematik Analiz	Basit	Kısmi olarak Karmaşık	Karmaşık
Bağımsız hareket	Hayır	Evet	Hayır
Çalışma alanı	Cone 140° with ±30° torsion	±90° ±90° ±120°	±120° ±120° ±120°
Zemine bağlı sensörler	Evet	Kısmi olarak	Hayır
Mafsal türleri	R	R-S-E	R
Maliyet	Yüksek	Orta	Düşük

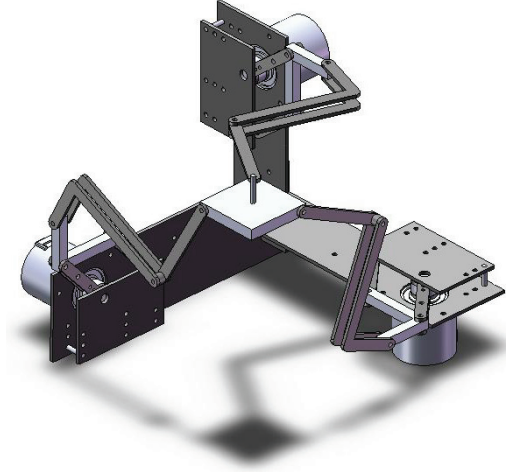
Nihai mekanizmanın üretimi temelde mekanizmanın ve kontrol sisteminin tasarımı ve üretimi olmak üzere, iki ana aşamadan oluşmaktadır. Mekanizma için yapısal ve kinematik hesaplamaları yapılmış (bkz Bölüm 4.2 ve 4.3), CAD ortamında (Solidworks) tasarım son halini almıştır. Kontrol sistemi algoritması oluşturulmuş, sanal ortamda test edilmiş (ISIS) ve üretilmiştir.

Sistemin yapısı için korozyon ve kuvvet direnci açısından malzemenin maliyetinin yüksek olmasına rağmen paslanmaz çelikten lazer kesim tezgahında üretilmiş, hassasiyeti azaltmasına rağmen, çalışmanın ilk örnek (prototip) olması, düşük üretim süresi ve kolay montajı nedeni ile eklemler kayar bağlantı elemanları ile birleştirilmiştir.

Kontrol sistemi Microchip firmasının 16f877 mikro-işlemcisi ile bilgisayarın seri portu üzerinden sağlanmıştır. Kontrol devresi, olası sistem hatalarına karşı optik elemanlarla elektronik olarak birbirinden bağımsız olarak üretilmiş, motorlar ve mikro işlemci gerilim dalgalanmasına karşı iki ayrı gerilim kaynağı tarafından beslenmesi sağlanmıştır. Kontrol için program mantığı oluşturulduktan sonra

Visual Basic bilgisayar dilinde programlanarak sistemin denetimi sağlanmıştır.

Sistemin kavramsal tasarım aşamasında dik olan kartezyen koordinat düzlemi (bkz. Şekil 3), paralel konuma getirilmiş (bkz. Şekil 7), böylece sistemin çalışma alanı artırılmıştır.



Şekil 7. Nihai Tasarım

4.2. Yapısal Analiz

Yapının ana kısmı üç serbestlik dereceli paralel bir manipülatördür. Bu kısmın özellikleri Alizade vd. [19] verdiği notasyona göre Tablo 3 te verilmiştir.

Tablo 3. Manipülatörün Yapısal Özellikleri

λ	B	j_B	C_L	L	F_T
6	1	3	3	2	15
Sınıf	Tip	Çeşit	Sıra	Modifikasyon	
1	3	0	3	1	

Bu özelliklerine göre sistemin serbestlik derecesi Denklem 1 kullanılarak hesaplanırsa $M = (1-3)6 + 15 = 3$ olduğu görünür

$$M = (B - C)\lambda + \sum f_i \quad (1)$$

Bu denklemde;

$\sum f_i$ toplam eklem sayısı

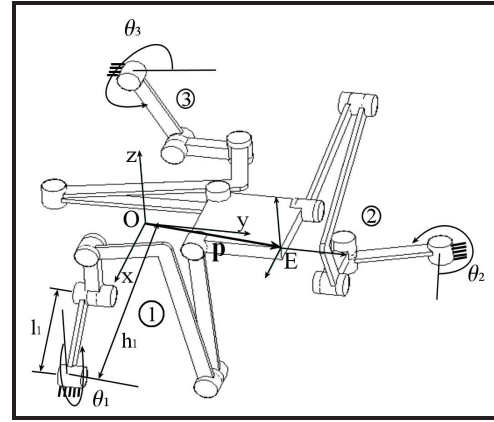
C toplam bacak sayısı

B toplam platform sayısını verir.

4.3. Kinematik Analiz

Sistemde platformun pozisyonları motorların oryantasyonlarıyla belirlemektedir. Sistem bağımsız bir manipülatör olduğundan dolayı platformun $\{x, y, z\}$ eksenlerindeki hareketleri sadece o eksenlerdeki motorlara bağımlı olacaklardır. Bu özellik sebebiyle sistemin doğru ve ters analizleri kolaydır.

Şekil 8'de manipülatörün kinematik analizi için koordinat ilişkileri gösterilmektedir. Paralel yapıda sabit platform koordinat sistemi $\{O\}$ ve hareketli platform koordinat sistemi $\{E\}$ şekilde gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Hareketli platformun koordinat sistemi, $\{E\}$, her bir kinematik zincirin platforma bağlantısının gerçekleştiği dönel eklemlerin dönme eksenlerinin keştiği nokta olarak alınmıştır. Bu sayede kinematik denklemler daha basit bir şekilde elde edilebilmiştir. Şekilde gösterilen p vektörü hareketli platformun koordinat sisteminin, $\{E\}$, sabit platformunkine, $\{O\}$, göre pozisyonunu gösterir. Şekilde h_i yere bağlı mafsalların yer koordinat orijinine göre ve l_i tahrik edilmiş olan linklerin uzunluğudur.



Şekil 8. Nihai Tasarımın Analizi

Eksenel elemanlarına göre denklem (2)'deki gibi tanımlarsak

$$\vec{p} = P_1\vec{u}_1 + P_2\vec{u}_2 + P_3\vec{u}_3 \quad (2)$$

Düz kinematik çözümü denklem (3)'teki gibidir.

$$P_i = h_i + l_i \sin(\theta_i); \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Platformun hız komponentleri denklem (4)'teki gibi yazılır.

$$V_i = l_i \cos(\theta_i) \dot{\theta}_i; \quad i = 1,2,3 \quad (4)$$

Aynı zamanda sistemin ters kinematik analizi denklem seti (3) kullanılarak aşağıdaki denklemde (5) gösterildiği gibi hesaplanır. Böylece eklem değişkenlerinin değerleri istenen platform koordinat merkezi konumuna göre bulunur.

$$\sin(\theta_i) = \frac{P_i - h_i}{l_i} \quad i = 1,2,3$$

$$\cos(\theta_i) = \sigma \sqrt{1 - \sin^2(\theta_i)} \quad \sigma = \pm 1 \quad (5)$$

$$\theta_i = \arctan_2(\sin(\theta_i), \cos(\theta_i))$$

5. SONUÇ

Günümüzde birçok değişik uygulamada kuvvet ve yüzey geri beslemesine, hassasiyet ve gerçekçilik için ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için haptik sistemler gittikçe artan oranda hem endüstriyel uygulamalarda hemde bilimsel amaçlı çalışmalar için kullanılmaya başlamıştır. Hassaslığın önemli olduğu bu sistemlerde, mekanizma ve kontrol döngüsünün karakteristiği önemli olmakta, bunun için tasarım ve üretim aşamaları önem kazanmaktadır.



Şekil 9. Üretilen İlk Prototip

Bu çalışmada haptik sistemler için kullanılabilir yeni bir mekanizma tasarlanması ve haptik uygulamalar için bazı iyileştirmeler amaçlanmıştır. Bu kapsamda sistemde motorlar doğrudan sürülmüş (direct drive) ve sistemin rijit olması sağlanmıştır.

Sistemin çalışma alanının artırılması amacıyla değiştirilen kartezyen koordinat düzeleminin (bkz. Şekil 9) sistemin durağan haldeki yükünün motorlara eşit olarak dağılmamasına neden olması sebebi ile kavramsal tasarımda olduğu gibi kalması kararlaştırılmıştır.

Maliyetin yükselecek olmasına rağmen, sistemde kullanılan kayar mesnetlerin rulmanlı yataklar ile değiştirilmesi ve sistemin haptik çalışma biçimini sağlaması için prototipte kullanılan step motorların servo motorlar ile değiştirilmesi planlanmaktadır.

Sistem üzerinde önerilen iyileştirmelerin gerçekleşmesi ve sistemin hibrit yapısında üretilmesini takiben üretilen haptik cihaz sanal gerçeklik simülatörlerinde sınanacaktır.

KAYNAKÇA

1. Seiichiro Katsura, Wataru Iida, Kouhei Ohnishi, "Medical mechatronics An application to haptic forceps", *Annual Reviews in Control*, Cilt 29, Sayı 2, 2005, 237-245.
2. B. Maurina, O. Piccin, B. Bayle, J. Gangloff M. de Mathelin, L. Soler, A. Gangi, "A new robotic system for CT-guided percutaneous procedures with haptic feedback", *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery. Proceedings of the 18th International Congress and Exhibition*, Haziran 2004, 515-520.
3. Shahram Payandeh, Temei Li, "Toward new designs of haptic devices for minimally invasive surgery", *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery. Proceedings of the 17th International Congress and Exhibition*, Haziran 2003, 775-781.
4. Franck P. Vidala, Nicholas Chalmers, Derek A. Gould, Andrew E. Healey, Nigel W. Johna, "Developing a needle guidance virtual environment with patient-specific data and force feedback", *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery*, Mayıs 2005, 418-423.
5. Stephen Schendel, Kevin Montgomery, Andrea Sorokin, Giancarlo Lionetti, "A surgical simulator for planning and performing repair of cleft lips", *Journal of*

- cranio-maxillo-facial surgery*, Cilt 33, 2005, 223-228.
6. P. Wang, A.A. Becker, I.A. Jones, A.T. Glover, S.D. Benford, C.M. Greenhalgh, M. Vloeberghs, "A virtual reality surgery simulation of cutting and retraction in neurosurgery with force-feedback", *Computer methods and programs in biomedicine*, Cilt 84, 2006, 11-18.
 7. H. Maass, H.K. Cakmak, U.G. Kuehnapfel, C. Trantakis, G. Strauss, "Providing more possibilities for haptic devices in surgery simulation", *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery*, Mayıs 2005, 725-729.
 8. Kevin Montgomery, , LeRoy Heinrichs, Cynthia Bruyns, Simon Wildermuth, Christopher Hasser, Stephanie Ozenne, David Bailey, "Surgical simulator for diagnostic and operative hysteroscopy", *Proceedings of the conference on Visualization*, 449-452, 2001, San Diego, California.
 9. Tatsushi Tokuyasua, T. Tadashi Kitamura, Genichi Sakaguchi, Masashi Komeda, "Development of a simulation system with a haptic device for cardiac muscle palpation", *International Congress Series*, 2005
 10. VOXEL-MAN World Wide Web site, <http://www.voxel-man.de/>, VOXEL-MAN, Mart 2009.
 11. M. Heiland, A. Petersik, B. Pflesser, U. Tiede, Rainer Schmelzle, K.-H. Hohne, H. Handels, "Realistic haptic interaction for computer simulation of dental surgery", *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery. Proceedings of the 18th International Congress and Exhibition*, Haziran 2004, 1226-1229.
 12. T. Sohmura, H. Hojo, M. Nakajima, K. Wakabayashi, M. Nagao, S. Iida, T. Kitagawa, M. Kogo, T. Kojima, K. Matsumura, T. Nakamura, J. Takahashi, "Prototype of simulation of orthognathic surgery using a virtual reality haptic device", *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Cilt 33, 2004, 740-750.
 13. St. Fahlbusch, S. Mazerolle, J.-M. Breguet, A. Steinecker, J. Agnus, R. P'erez, J. Michler, "Nanomanipulation in a scanning electron microscope", *Journal of Materials Processing Technology* Cilt 167, Sayı 2-3, Ağustos 2005, 371-382.
 14. Andrew M. Wollacott, Kenneth M. Merz Jr., "Haptic applications for molecular structure manipulation", *Journal of Molecular Graphics and Modelling* Cilt 25, Sayı 6, Mart 2007, 801-805.
 15. Monica Bordegoni, Giorgio Colombo, Luca Formentini, "Haptic technologies for the conceptual and validation phases of product design", *Computers & Graphics*, Cilt 30, Sayı 3, Haziran 2006, 377-390.
 16. Zhan Gao, Ian Gibson, "Haptic sculpting of multi-resolution B-spline surfaces with shaped tools", *Computer-Aided Design archive*, Cilt 40, Sayı 10-11, October, 2008, 1055-1066.
 17. Xuejian He, Yonghua Chen, "Haptic-aided robot path planning based on virtual teleoperation", in press in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.
 18. Kyihwan Park, Byunghoon Bae, Taeoh Koo, "A haptic device for PC video game application", *Mechatronics*, Cilt 14, Sayı 2, Mart 2004, 227-235.
 19. Rasim I Alizade, Çağdaş Bayram, Structural Synthesis of parallel manipulators, *IFTOMM J. Mech. Mach. Theory*, Cilt 39, 2004, 857-870.